

Partial Translation of Japanese Patent  
Laying-Open No. 4-172208

... omitted ...

In accordance with the formula to obtain a reflectance, M reflectances  $R_1^C \dots, R_M^C$  are calculated with the film thickness as a variable, using known refractive indices  $n_0, n_1, \dots, n_N, n_S$ , incident angle  $\phi_0$ , and selected wavelength  $\lambda_1, \dots, \lambda_M$ .

The well known formula of:

$$R = \left| \frac{\eta_0 (m_{11} + \eta_S m_{12}) - (m_{21} + \eta_S m_{22})}{\eta_0 (m_{11} + \eta_S m_{12}) + (m_{21} + \eta_S m_{22})} \right|^2, \quad \dots (3)$$

can be used to obtain the reflectance of the multilayer film. It is to be noted that  $\eta_i = n_i / \cos \phi_i$  for the P component and  $\eta_i = -n_i \cos \phi_i$  for the S component, where  $\eta_i$  is the effective refractive index of each layer,  $\phi_i$  is the incident angle of the i-th layer, and  $n_i$  is the refractive index. When  $m_{11} \dots m_{22}$  are the elements of the characteristic matrix of the thin film with  $\lambda$  as the wavelength,  $d_i$  as the film thickness of the i-th layer,

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i d_i \cos \phi_i$$

as the phase, the characteristic matrix is obtained by:

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i d_i \cos \phi_i$$

where  $T_i$  is the characteristic matrix and  $j$  is the imaginary unit. In the case where each layer has optical absorptance, the refractive index is naturally a complex.

By inserting the refractive index of each layer and the measured wavelength into formula (3) to obtain reflectance  $R$ , reflectance  $R^c$  at that wavelength is obtained as a function with only the film thickness of each layer as a variable.

... omitted ...

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 04-172208

(43)Date of publication of application : 19.06.1992

(51)Int.Cl.

G01B 11/06

(21)Application number : 02-299605

(71)Applicant : OLYMPUS OPTICAL CO LTD

(22)Date of filing : 05.11.1990

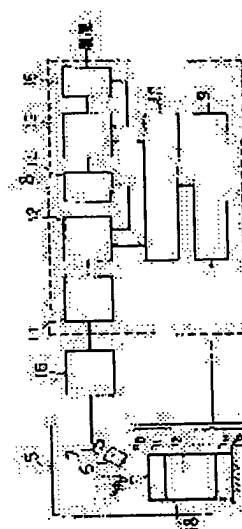
(72)Inventor : WADA YORIO

## (54) APPARATUS OF OPTICAL TYPE FOR MEASURING FILM THICKNESS

### (57)Abstract:

**PURPOSE:** To measure simultaneously at high speed several film thicknesses of a multi-layer film by specifying previously the region and neighborhood in which the sum of optical thicknesses of several layers of an optical thin-film is constant, as a solution-existing region, and finding several film thicknesses around the minimum value of an evaluation function within the region by a global optimization method.

**CONSTITUTION:** Measuring light is emitted at a constant incident-angle, the wavelength is properly selected and the reflectance corresponding to it is selected by a means 5. On the other hand, the reflectance is operated by a means 9 based on several known refractive indices, incident angles and wavelengths, and a reflectance function for each wavelength in which only film thickness is made a variable is output, the evaluation function to judge the whole magnitude of the difference of the measured spectral reflectance for each wavelength and the reflectance function is found by a means 10. The region and neighborhood where the sum of the product (optical thickness) of the refractive index of each layer of the optical thin-film and the film thickness is constant are estimated as the existing region of a solution by a specifying means 11 other than this, and a group of the film thicknesses where the evaluation function is around the minimum value is found with the global optimization technique by the prescribed technique 12. Each film thickness of multi-layer can be simultaneously measured at high speed in this constitution even if each film thickness is unknown.



### LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

⑩ 日本国特許庁(JP)

⑪ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報(A) 平4-172208

⑬ Int. Cl.<sup>5</sup>  
G 01 B 11/06

識別記号 庁内整理番号  
G 7625-2F

⑭ 公開 平成4年(1992)6月19日

審査請求 未請求 請求項の数 1 (全10頁)

⑮ 発明の名称 光学式膜厚測定装置

⑯ 特 願 平2-299605

⑰ 出 願 平2(1990)11月5日

⑱ 発 明 者 和 田 順 雄 東京都渋谷区幡ヶ谷2-43-2 オリンパス光学工業株式会社内

⑲ 出 願 人 オリンパス光学工業株式会社 東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号

⑳ 代 理 人 弁理士 篠原 泰司 外1名

明 細 書

1. 発明の名称

光学式膜厚測定装置

2. 特許請求の範囲

屈折率が既知の基板上に屈折率が既知の物質から成る複数の層を積層して構成した光学薄膜の各層の膜厚を測定する光学式膜厚測定装置において、

前記光学薄膜の反射率を複数の所定の波長について測定する分光反射率測定手段と、

前記既知の屈折率と所定の波長を用いて、各層の膜厚のみを変数として前記光学薄膜の前記各波長毎の反射率を表わす反射率関数を算出する反射率関数算出手段と、

前記分光反射率測定手段により測定された各波長毎の分光反射率と前記反射率関数算出手段により求めた反射率関数との差の総体的な大きさを示す評価関数を膜厚のみの関数として算出する評価関数算出手段と、

前記各層の屈折率と膜厚の積即ち光学的厚さの和が一定となる領域及びその近傍を解の存在する

領域として予め指定する領域指定手段と、

前記領域指定手段により定めた領域内において、前記評価関数の最小値近傍での光学薄膜の各層の膜厚を大域最適化法により求める大域最適化手段と、

を備えたことを特徴とする光学式膜厚測定装置。

3. 発明の詳細な説明

〔産業上の利用分野〕

本発明は、光学薄膜について非接触且つ非破壊の膜厚測定を行なうための光学式膜厚測定装置に関する。

〔従来の技術〕

従来、基材上に積層された複数の層から成る光学薄膜の多層膜の各層の膜厚を求める方法としては、分光反射率測定装置を用いて複数の波長によって夫々反射率を測定し、測定光の入射角と入射媒質、基板及び各層の屈折率とを既知として多層膜の反射率を膜厚のみを変数とする関数として計算し、反射率の測定値と計算値との各波長毎の差の総体的な大きさを示す評価関数を設定して、こ

の評価関数値が最小となる膜厚の組合せを求めることにより、多層膜各層の膜厚を得られるようにした方法が知られている。

しかし、このような関数系では一般に複数の局所的な解が存在するため、これら局所解に収束するのを避けて大域的な解を探さなければならない。そのため複数の局所解が存在しても大域的な解を見つけることができる大域最適化手法を用いれば、多層膜各層の膜厚を同時に得ることができる。

(発明が解決しようとする課題)

しかしながら、実際には多くの局所解が存在するような関数系で大域最適化法を用いる場合、局所解に収束しないよう十分な数のサンプリング点を取る必要がある。この時、解を探索する領域を広げるに従って、局所解への収束を防ぐためにより細かいサンプリングを行わなければならない、演算時間が指数関数的に増大してしまう。そこで実際には、例えば2層膜の場合においては第10図(a)に示すように予め膜の設計値等のデータをもとに、サンプリング点中の各層の膜厚 $d_1, \dots$

ればならず、演算時間が指数関数的に増大する。この演算時間は、解の存在する領域を予め推定することができれば、その近傍に限定して解を探ることにより短縮することができる。以下に二層膜の例を用いて解の存在する領域の推定法の基本となる考え方を説明する。

第11図(a)は、屈折率 $n_1$ 、膜厚 $d_1$ の単層膜1を示す。ここで、薄膜の光学的厚みは膜の屈折率 $n$ と膜厚 $d$ の積( $n \times d$ )で表わされる。次に、図(b)は屈折率 $n_1$ 、膜厚 $d_1$ で図(a)の単層膜1と光学的厚みの等しい単層膜2を示す。又、図(c)は、屈折率 $n_1$ 、膜厚 $d_1$ の上層3aと、屈折率 $n_2$ 、膜厚 $d_2$ の下層3bとから成る二層膜3を示しており、上層3aと下層3bの光学的厚みの和は単層膜1、2夫々と等しいものとする。即ち、

$$n_1 \times d_1 = n_1 \times d_1' = n_1 \times d_1 + n_2 \times d_2 \quad \dots (1)$$

となる。

ここで二層膜3に関して、これを上層3aの屈

折率 $n_1$ が存在する場所を含む夫々下限値 $d_1, \dots, d_1, \dots$ と上限値 $d_1, \dots, d_1, \dots$ から成る推定領域を設定し、その範囲内で最適化計算を行う。このため、解となる膜厚が予め全く分からないような場合については探索推定領域を広く設定し、莫大な時間をかけて計算しなければならない、又第10図(b)のように推定領域が解を含まないような場合は、長い演算時間を要したにも拘らず正しい解が求まらないという欠点がある。

本発明は、上述のような問題点に鑑み、解を含む領域をより限定でき、解が全く不明な場合でもより高速に多層膜の各層の膜厚を同時に測定できるようにした光学式膜厚測定装置を提供することを目的とする。

(課題を解決するための手段)

大域最適化法は、複数の局所的解が存在する中から大域的な解を探すものであるが、一般的に莫大な演算量が必要なため、演算時間が長い。また解を探索する領域を広げるほど、局所解への収束を防ぐためにより細かいサンプリングを行わな

ければならず、演算時間が指数関数的に増大する。この演算時間は、解の存在する領域を予め推定することができれば、その近傍に限定して解を探ることにより短縮することができる。以下に二層膜の例を用いて解の存在する領域の推定法の基本となる考え方を説明する。

折率 $n_1$ をもつ単層膜1として膜厚を計算して $d_1$ を求め、次に下層3bの屈折率 $n_2$ をもつ単層膜2として膜厚を計算して $d_2$ を求める。そして第12図において、二層膜3に関して横軸に上層3aの膜厚、縦軸に下層3bの膜厚をとった場合、夫々 $d_1, d_2$ が最大値となり、上述の(1)式の関係から、膜厚 $d_1, d_2$ は上下各層の光学的厚みの和が一定即ち $\sum n \times d = \text{一定}$ となる線上に乗ることが理解できる。このように二層膜を、一方の膜の屈折率を有する同一の光学的厚さをもつ単層膜に置き換えて各膜厚 $d_1, d_2$ を求め、これらを結ぶ線上に探せば求めるべき解 $d_1, d_2$ が存在する。

本発明はこの点に着目して成されたものである。

本発明による光学式膜厚測定装置は、屈折率が既知の基板上に、屈折率が既知の物質から成る複数の層を複層して成る光学薄膜の各層の膜厚を測定する光学式膜厚測定装置において、

光学薄膜の反射率を複数の所定の波長について測定する分光反射率測定手段と、

既知の屈折率と所定の波長を用いて各層の膜厚のみを変数として光学薄膜の各波長毎の反射率を表わす反射率関数を算出する反射率関数算出手段と、分光反射率測定手段によって測定された各波長毎の分光反射率と反射率関数算出手段によって求めた反射率関数との差の総体的な大きさを示す評価関数を膜厚のみの関数として算出する評価関数算出手段と、各層における屈折率と膜厚との積の和が一定となる領域及びその近傍を解の存在する領域として予め指定する領域指定手段と、この指定された領域内で評価関数が最小値近傍となる膜厚を大域最適化法により求める大域最適化手段と、を備えたことを特徴とするものである。

#### (作用)

複数の層が積層された光学薄膜の各膜厚を求める場合には、まず分光反射率測定手段で、所定の波長域の測定光を一定の入射角で光学薄膜に照射して分光反射率を測定し、そのうち幾つかの波長を適宜選択してこれら波長に対する反射率の値を測定しておき、一方、既知の各屈折率、測定光の

決定手段8は、反射率演算手段9と評価関数演算手段10と大域解推定手段11と大域最適化手段12と局所最適化手段13とを備えており、大域最適化手段12及び局所最適化手段13には夫々収束判定手段14及び15が付加されている。更に、分光反射率測定手段5と膜厚決定手段8との間にはデータ選定手段16が設けられている。

分光反射率測定手段5においては、屈折率 $n_s$ の基材上に設けられた屈折率 $n_1, n_2, \dots, n_N$ の物質から成るN層多層膜18が屈折率 $n_s$ の媒質中に置かれている。この多層膜18に図示しない所定の光源から所定の波長域に及ぶスペクトル分布を有する測定光を、所定の入射角 $\phi$ で入射させ、その反射光を分光器6を介して光電変換手段7で受けて所定の波長範囲における分光反射率を連続的に測定する。

尚、分光反射率測定に用いる測定光は、測定対象となる光学薄膜が使用される波長域の中で適当に設定すればよく、例えば光学薄膜がレンズの反射防止膜等の場合には可視光でよい。

入射角及び選択された波長に基づいて、反射率関数算出手段で光学薄膜の各膜厚のみを変数とする各波長毎の反射率を関数として算出し、測定された各波長毎の分光反射率と反射率関数との差の総体的な大きさを判定するための評価関数を評価関数算出手段で求め、これとは別に領域指定手段で、光学薄膜の各層の屈折率と膜厚の積である光学的厚さの和が一定となる領域及びその近傍を解の存在する領域として予め指定しておき、この指定された領域内において、上述の評価関数が最小値近傍となる膜厚の組を大域最適化手法で求める。

#### 〔実施例〕

以下、図示した実施例に基づき本発明を詳細に説明する。

第1図は本発明による光学式膜厚測定装置の一実施例を示すブロック図、第2図は上記実施例の膜厚決定手段におけるデータ処理のフローチャートである。

第1図において、分光反射率測定手段5は分光器6及び光電変換手段7を備えている。又、膜厚

そして、この測定値から、データ選定手段16においてM個の波長 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ に対応する反射率データ $R_1^c, R_2^c, \dots, R_M^c$ が選定される。ここでMを大きくすると膜厚決定の精度が高まるが、データ処理に時間がかかるので、精度と時間の関係で適当な値を選べばよい。尚、予め定めたM個の波長についてのみ反射率測定を行う場合には、データ選定手段16は不要である。

一方、反射率演算手段9においては、反射率を求める公式にしたがい既知の屈折率 $n_s, n_1, \dots, n_N, n_s$ 及び入射角 $\phi$ 、並びに選定した波長 $\lambda_1, \dots, \lambda_M$ を用いて、膜厚を変数とするM個の反射率 $R_1^c, \dots, R_M^c$ を計算する。ここで多層膜の反射率を求める公式としては公知の、

$$R = \left| \frac{r_s(n_N + i, n_N) - (n_N + i, n_N)}{r_s(n_N + i, n_N) + (n_N + i, n_N)} \right|^2 \quad \dots (3)$$

を用いることができる。但し、 $n_i$ は各層の実効

屈折率で、第  $i$  層の入射角を  $\phi_i$ 、屈折率を  $n_i$  とすると、P 成分については  $\eta_i = n_i / \cos \phi_i$ 、S 成分については  $\eta_i = -n_i \cos \phi_i$  で与えられるものである。又、 $m_{11}, \dots, m_{12}$  は薄膜の特性行列の要素で、波長を  $\lambda$ 、第  $i$  層における膜厚を  $d_i$ 、位相を  $\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i d_i \cos \phi_i$  とし、特性行列を  $T_i$  とするとき、 $j$  を虚数単位として

$$T_i = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_i & j \eta_i \sin \delta_i \\ j \eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{pmatrix}$$

で与えられるものである。各層に光学的吸収がある場合には、当然屈折率は複素数となる。

上述の反射率  $R$  を求める公式(3)に、各層の屈折率と測定波長を代入すれば、その波長における反射率  $R^*$  が各層の膜厚のみを変数とする関数として求められる。

上述のようにして測定された反射率データ  $R_1^*, R_2^*, \dots, R_N^*$  と演算された反射率関数  $R_1^*, R_2^*, \dots, R_N^*$  とに基づいて膜厚の決定が行なわれる。

しい単層膜 1、2、二層膜 3 を例にとって、これらが屈折率  $n$  の媒質中に、しかも屈折率  $n$  の基板上に配置されたものとして反射率を計算した図を示すと第 4 図のようになる。即ち、二層膜 3 について、 $n_1 = 2.0$ 、 $d_1 = 200 \text{ nm}$ 、 $n_2 = 1.45$ 、 $d_2 = 200 \text{ nm}$  として分光反射率を計算すると、c に示す曲線となる。次に屈折率  $n_1 = 2.0$ 、 $d_1 = 345 \text{ nm}$  の単層膜 1 の分光反射率を計算すると、a のようになり、又  $n_1 = 1.45$ 、 $d_1 = 476 \text{ nm}$  の単層膜 2 の分光反射率を計算すると、b のようになる。

第 4 図から明らかなように光学的厚さの等しいものについては、分光反射率の曲線は似たものとなり、夫々の極大値又は極小値をとる波長は一致することがわかる。

次に屈折率  $n$  の基板上に重畳されている第 1 図の二層膜に関して、大域解推定手段 11 において行なわれる解の存在する領域を推定する具体的手順について述べる。

まず、この二層膜を上層の膜の屈折率  $n_1$  を有

次に、本発明における、大域的な解の存在する領域の推定方法を、第 1 図に示す二層膜に関して以下に詳しく述べるが、その前に単層膜における反射率の理論について簡単に触れておく。

屈折率  $n$  の基板上に屈折率  $n_1$ 、膜厚  $d_1$  の単層膜が形成されている場合、この単層膜が屈折率  $n$  の媒質中に置かれているとすると、その反射率  $R$  は次の式で与えられ、反射率曲線は第 3 図のようになる。

$$R = \frac{(n_1^2 + n^2)(n_1^2 + n^2) - 4n_1 n^2 \cos \delta}{(n_1^2 + n^2)(n_1^2 + n^2) - 4n_1 n^2 \cos \delta} \dots (4)$$

ここで、

$$\delta = 4\pi n_1 d_1 \cos \theta / \lambda$$

である。

波長による反射率の周期性はこの  $\delta$  に起因するものである。即ち、複数の薄膜において光学的厚さである  $n d$  が等しければ、反射率の極大又は極小値は同じ波長にあらわれる。

ここで、第 1 図に示す、夫々光学的厚さの等

する単層膜に置き換える。単層膜の膜厚を求める下記の式(5)を適用して膜厚  $d_1'$  を求める。(5)式は単層膜の膜厚を、測定された分光反射率曲線における極小値又は極大値をとる波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  と、その間に存在する極大と極小の数  $X$  と、膜の屈折率  $n$  とから求める式である。

$$d_1 = \frac{X}{4n} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \dots (5)$$

こうして、膜厚  $d_1'$  を求める。又、下層の膜の屈折率  $n_2$  を用いて、再び(5)式を適用して、膜厚  $d_2'$  を得る。次に、第 5 図に示すように  $d_1$ 、 $d_2$  平面内で、 $d_1'$  と  $d_2'$  を結ぶ。

第 5 図において具体的な数値をいれて二層膜の分光反射率を計算したものを示す。 $d_1 = 200 \text{ nm}$ 、 $d_2 = 200 \text{ nm}$ 、基板の屈折率  $n_s = 3.88$ 、吸収係数  $k_s = -0.024$  として計算し、測定された分光反射率と一致することを確認した。又、上層膜の屈折率  $n_1 = 2.0$  として(5)式を用いれば、 $d_1' = 345 \text{ nm}$  となる。又、下層膜の屈折率  $n_2 = 1.45$  のとき、 $d_2' = 475 \text{ nm}$  となる。



この結果を第5図に示すと、求めるべき解である膜厚 $d_1, d_2$ は $d_1', d_2'$ を結ぶ線上に存在することがわかる。

即ちこの線上を逐次探せば、解を求めることが出来る。実際には第5図の破線で表わされるように、適当な許容範囲を持たせてその範囲内で探すことになる。

こうして解の存在する領域が限定されたあと、この領域内において反射率の測定値と計算値の差の総体的な大きさを示す評価関数の最小値を探すため、大域最適化手段12において、大域最適化の手法を用いて最小値近傍の解をまず求める。次に局所最適化手段13において、局所最適化の手法により最小値を求めることにより各層の膜厚を得ることができる。

ここで、大域最適化及び局所最適化の手法について説明すると、まず、評価関数演算手段10において、測定データと計算データの総体的な差の大きさを評価するための評価関数に $R_1^m, \dots, R_m^m, R_1^c, \dots, R_m^c$ を代入して、評価

関数値を求める。これは膜厚 $d_1, \dots, d_m$ の関数となる。評価関数としては例えば

$$E = \sum_{i=1}^m W_i (R_i^c - R_i^m)^2 \quad \dots\dots(6)$$

のようなものが考えられる。ここで $W_i$ は式(6)の個々の評価関数の重みである。

この関数が最小値をとる点では $R_1^m$ と $R_1^c$ との差が全体的にみて最も小さくなっているから、この点における $d_1, \dots, d_m$ の値を被測定多層膜の各層の膜厚と考えてよい。

本発明においては、まず大域最適化法を用いて評価関数 $E$ の最小値を与える $d_1, \dots, d_m$ の夫々のおおよその値を求め、次にこの点を出発点として、局所最適化法を用いて $d_1, \dots, d_m$ の正確な値を得る。ここでまず、本実施例に用いる大域最適化法を第6図を用いて説明する。一変数 $x$ の関数 $y = f(x)$ の最小値を求める場合、まず最小値を含む変数の変動区間 $H$ を指定する。そしてこの区間 $H$ 内において適当な数のサンプリング点 $x_1, \dots, x_L$ を求め、これら

に対応する $f(x)$ の値の平均値

$$F_1 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L f(x_i) \text{ を求めると、} F_1 \text{ は必ず } F_1$$

より小さい。そこで $y = f(x)$ と $y = F_1$ の交点で決まる新たな変数 $x$ の区間 $H_1$ を求め、この区間内で再び適当な数のサンプリング点を取り、 $f(x)$ の平均値を求める。この手順を繰り返すとその度毎に平均値は小さくなって行き局所的な極小値の有無に拘らず $F_1, H_1$ に示すように $f(x)$ の最小値及びそれを与える $x$ の値に向って収束して行く。平均値 $F_1$ 又は二つの平均値の差 $F_1 - F_{1-1}$ がある設定値以下になれば、実質的に最小値 $X_{min}$ に到達したとみなして良い。

この方法を膜厚計算に適用するには、評価関数演算手段10で、先に説明した大域解推定手段11により求められた範囲の中から、適当な数の $(d_1, \dots, d_m)$ の組 $D_1 = (d_{11}, \dots, d_{m1})$ ,  $D_2 = (d_{12}, \dots, d_{m2})$ ,  $D_3 = (d_{13}, \dots, d_{m3})$ をサンプリング点として指定する。そして、各組の値を評価関数に代入して、

$E(D_1), \dots, E(D_3)$ を計算し、それらの平均値

$$\bar{E}_1 = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S E(D_i) \quad \dots\dots(7)$$

を求める。サンプリング点の数、サンプリング点同志の間隔は任意でよい。

ここで収束判定手段14により、 $\bar{E}_1$ の値又はその変化率が予め定めた設定値より大きければ再び大域最適化法を繰り返す。この場合には、平均値 $\bar{E}_1$ よりも評価関数が小さい領域を新たな膜厚変動区間として、大域解推定手段14で求められた範囲から領域 $[d_1]_1, [d_2]_1, \dots, [d_m]_1$ を求め、先に指定した $(d_1, \dots, d_m)$ の組を新たな膜厚変動区間から選んだ値で置き替えると共に $\bar{E}_1$ を $\bar{E}_2$ で置き替えて再び新しい膜厚変動区間内において、サンプリング点を指定し、評価関数を計算する。これを $u$ 回繰り返して、平均値 $\bar{E}_u$ 又は $\bar{E}_u$ と $u-1$ 回目の平均値 $\bar{E}_{u-1}$ との差が予め設定した値以下になった時はば最小値の近傍に収束したものとして、このとき

得られた領域  $[d_1], \dots, [d_M]$  の中から適当に定めた  $(d_1, \dots, d_M)$  の組を各層の膜厚の概略値として出力する。ここで収束判定を厳しくすると時間がかかり、緩くすると局所解に落ちてしまうので、適当な値を選ぶ必要がある。

次に、こうして得られた各層の膜厚の概略値  $(X_{1,1}, \dots)$  を初期値として、局所最適化手段 13において局所最適化法を用いて評価関数の最小値  $(X_{1,1}, \dots)$  を求める。ここではそのような局所最適化法の例として最小自乗法を取り上げて説明する。

即ち、N層の多層膜各層の膜厚を夫々変数  $d_1, \dots, d_M$  とし、これを用いて計算した各波長での反射率を成分とするベクトルを  $R^c = (R_1^c, \dots, R_M^c)$ 、各波長における実測値を成分とするベクトルを  $R^m = (R_1^m, \dots, R_M^m)$  として、実測値を目標としてこれに最も一致する反射率を与える膜厚  $d_1, \dots, d_M$  を求める。

最小自乗法では、目標値への接近度を示す単一

評価尺度として再び式(6)のような評価関数を用いる。

$$E = \sum_{i=1}^M W_i (R_i^c - R_i^m)^2 \quad \dots\dots(8)$$

ここで  $W_i$  は上式の個々の評価関数の重みであり、ここでは簡単のため  $W_i = 1$  とする。上式(8)では  $E \geq 0$  であるので、 $E$  が最小値をとる  $d_1, \dots, d_M$  の組を解として求める。ここで、 $R^c - R^m = (R_1^c - R_1^m, \dots, R_M^c - R_M^m)$  とすると、

$$E = \sum_{i=1}^M (R_i^c - R_i^m)^2 = (R^c - R^m)^T \cdot (R^c - R^m) \quad \dots\dots(9)$$

となるので、 $E$  の最小を求めるために  $E$  を各変数について偏微分する。

$$\frac{1}{2} \text{grad} E = A^T (R^c - R^m) = 0 \quad \dots\dots(10)$$

但し、

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_1^c}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial R_1^c}{\partial d_M} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial R_M^c}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial R_M^c}{\partial d_M} \end{bmatrix}$$

とする。また、

$$D_1 = \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_M \end{bmatrix}$$

を大域最適化法により得られた結果の膜厚の組合わせ

$$D = \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \vdots \\ \Delta d_M \end{bmatrix}$$

を各層の膜厚値の変化量とし、膜厚  $D_1$  に対する反射率を  $R^0$  とする。リニア領域間即ち  $D$  だけ膜厚を変化させたときの反射率  $R^c$  が

$$R^c \approx R^0 + A D \quad \dots\dots(11)$$

で表わされる領域間で局所最適化を行なうと仮定する ( $\Delta d_i$  は小さい値しかとらないので、これは十分良い近似となる。) と、式(10)は、

$$A^T (R^c - R^m) \approx A^T (A D + R^0 - R^m) = 0$$

故に

$$A^T A D + A^T (R^0 - R^m) = 0 \quad \dots\dots(12)$$

となり、変数  $d_1, \dots, d_M$  が互いに独立であり、 $M \geq N$  のとき

$$D = - (A^T \cdot A)^{-1} A^T (R^0 - R^m) \quad \dots\dots(13)$$

である。従って、最小自乗法を1回経たあとの結果の膜厚は

$$D_1 = D_0 + D \quad \dots\dots(14)$$

で与えられる。

次に、上記の  $D_1$  を  $D_0$  で置き換えて同様の計算を繰り返す。 $D_1$  に対する評価関数値又は膜厚が  $D_1$  から  $D_{1,1}$  に変わった際の評価関数値の変化率が予め設定した値より小さくなるまでこれを繰り返す、最終的に収束した値が求めるべき多層膜の各層の膜厚値となる。

上述のように本実施例によれば、膜厚が全く不明であるような多層膜であっても、解を探す範囲

を大幅に減少させることができ、多層膜各層の膜厚を同時に、しかも高速で測定することができる。

次に本実施例の具体的な実験例について説明する。

#### 実験例

まず基板上の二層膜について予め各層の屈折率と膜厚が分かっているものについて、上で述べた方法を用いて膜厚を求めてみた。そして同一性能のコンピュータのもとで従来例との比較を行った。各層の構成は、入射側媒質は空気( $n_0 = 1$ )、上層は窒化シリコン( $n_1 = 2.0$ )、下層はシリコン酸化膜( $n_2 = 1.46$ )、基板はシリコン( $n_3 = 3.88$ ,  $k_3 = -0.024$ )、上層の膜厚 $d_1 = 200\text{nm}$ 、下層の膜厚 $d_2 = 200\text{nm}$ である。測定光は垂直入射とし、波長 $400\text{nm}$ から $750\text{nm}$ の波長範囲内で71波長を選択した。

この二層膜をまず、屈折率 $n_1$ の単層膜として解析し膜厚 $d_1$ を求めた結果、 $345\text{nm}$ となった。次に屈折率 $n_2$ の単層膜として計算した結果、膜厚 $d_2 = 475\text{nm}$ となり前述の結果と一致する。

第三層の各膜厚を三次元の軸として表わし、各単層膜の対応する膜厚 $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ を対応する各軸上にとると、これら3点 $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ を結ぶ面内に求めるべき三層膜の各膜厚 $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ が存在することになる。

上述のように本実施例は、測定すべき各膜厚の探索領域を平面として表わすことができるから、探索領域を一次元少なくすることができ、計算時間の短縮化を一層促進させることができる。

#### 実験例

第二実施例に関して、 $n_1 = 1.46$ ,  $d_1 = 100\text{nm}$ ,  $n_2 = 2.0$ ,  $d_2 = 200\text{nm}$ ,  $n_3 = 1.46$ ,  $d_3 = 300\text{nm}$ として、三層膜の各膜厚が予め分かっているものについて実験した結果、従来680秒要した計算時間を150秒に短縮させることができた。

次に、本発明の第三実施例を第9図に基づいて説明する。本実施例は、二層膜の膜厚を上述の実施例よりも更に高速に計算できるようにしたものである。

まず、従来におけるこの二層膜の各膜厚の変動範囲は上層について $0\text{nm}$ から $1000\text{nm}$ 、下層について、 $0\text{nm}$ から $1000\text{nm}$ である。これを従来の装置を用いて求めた場合、演算に要した時間は約500秒であった。次に本発明による装置では演算時間は約300秒であった。この例で明らかに、本発明により計算時間を大幅に短縮できることがわかる。

次に、本発明を三層膜の膜厚測定に応用した第二実施例を説明する。三層膜の構造は第7図(a)に示されており、屈折率 $n_1$ の基板上に、屈折率が夫々 $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ の第一、第二、第三層が積層されている。そして、図(b), (c), (d)には夫々第一、第二、第三層の屈折率 $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ を有する単層膜が、屈折率 $N_1$ の基板上に夫々配置されており、夫々の単層膜の膜厚 $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ は図(a)の三層膜と同一の光学的厚みを有するように近似した値に構成されている。

そして、第8図に示すように、第一層、第二層、

図において、二層膜の上層及び下層の膜厚領域全体をメッシュ状に区切り、各線の交点である各点eでの組合せについて予め反射率の理論値を計算して、これを計算機のメモリー上に記憶しておく。つぎに前述の第一実施例のように光学的厚みが一定となる線を、上層及び下層についての各単層膜の膜厚 $d_1$ ,  $d_2$ を結ぶことによって求め、この線上にあるメッシュの各点eについて評価関数を計算する。理論値はすでにメモリー上にあるので評価関数を計算する際は、理論値と実測値を比較計算するだけで良く、従って計算時間を大幅に短縮でき、高速で各膜厚が求められる。そして評価関数が最小となる点が求めるべき膜厚である。

しかしながら反射率はメッシュ状に離散的に計算されているので、解となる点が必ずしもメッシュの点eと一致するとは限らない。この場合は、光学的厚みが一定の線 $d_1$ ,  $d_2$ 上に最も近いメッシュの各点eを出発値として局所最適化計算を行なう。これらの中には局所解に収束するものもあるが、収束時の評価関数の値を比べ、これが

最も小さくなる膜厚の組合せが求めるべき解となる。

そしてメモリー上の反射率の理論値はディスク等に保存しておけば、次の計算からはこれを読み出すだけでよい。

尚、大域解推定手段11は領域指定手段を構成する。

〔発明の効果〕

上述のように本発明に係る光学式膜厚測定装置は、光学薄膜の各層の光学的厚さの和が一定となる領域付近を解の存在する領域として予め指定する領域指定手段と、該指定された領域内における評価関数の最小値近傍での各層の膜厚を大域最適化法で求める大域最適化手段とを備えているから、各膜厚が全く不明であるような場合であっても、より高速に多層膜各層の膜厚を同時に測定することができるという、実用上重要な利点を有する。

#### 4. 図面の簡単な説明

第1図は本発明による光学式膜厚測定装置の第一実施例の基本構成を示すブロック図、第2図は

第1図の膜厚決定手段におけるデータ処理のフローチャート、第3図は単層膜の測定光波長に対する分光反射率分布を示す図、第4図は第11図の単層膜及び二層膜に対する測定光波長と反射率との関係を示す図、第5図は第11図の二層膜に関して光学的厚みの和が一定となる線の一例を示す図、第6図は大域最適化法を説明するための概念図、第7図及び第8図は本発明の第二実施例を示すものであり、第7図(a)は三層膜を示す図、(b), (c), (d)は三層膜の各層を夫々単層膜として示す図、第8図は三層膜に関して光学的厚みの和が一定となる平面を示す図、第9図は本発明の第三実施例に関する第5図と同様な図、第10図(a), (b)は従来装置における解の推定領域を示す説明図、第11図、第12図は本発明の原理を説明するための図であり、第11図(a)は二層膜を示す図、(b), (c)は二層膜の各層を夫々単層膜として示す図、第12図は二層膜に関して光学的厚みの和が一定となる線を示す図である。

5.....分光反射率測定手段、9.....反射率演算手段、10.....評価関数演算手段、11.....大域解推定手段、12.....大域最適化手段。

代理人 篠原 泰司  
代理人 鈴木 三義



図 3

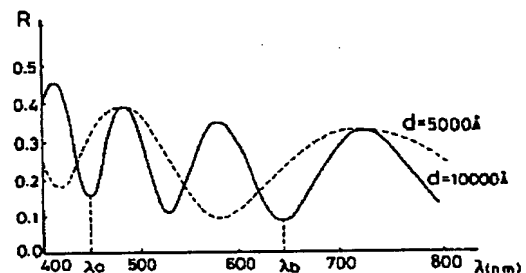
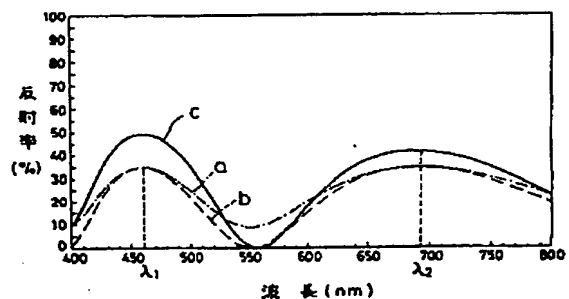


図 4



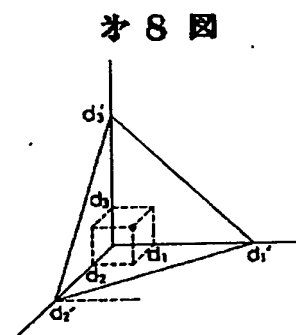
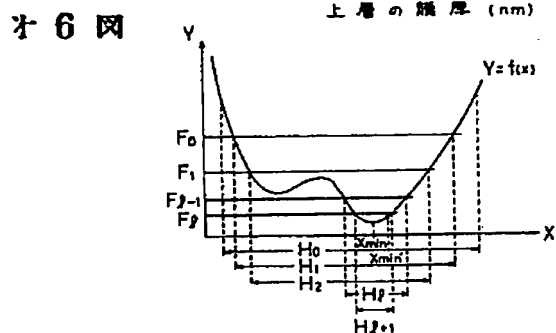
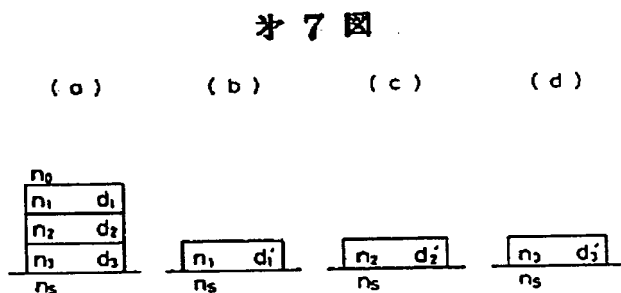
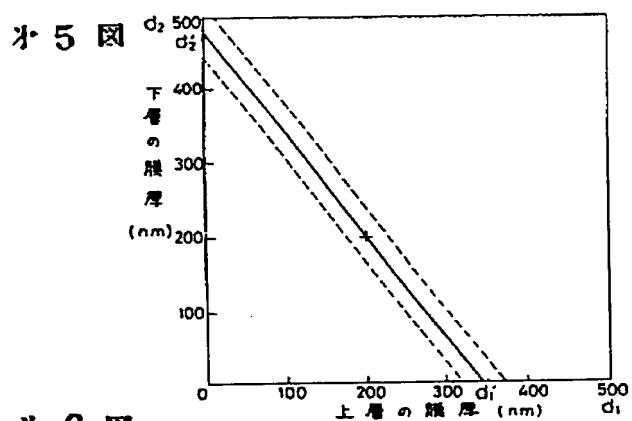
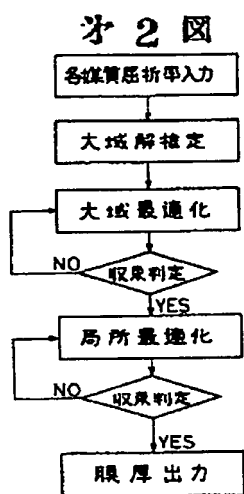
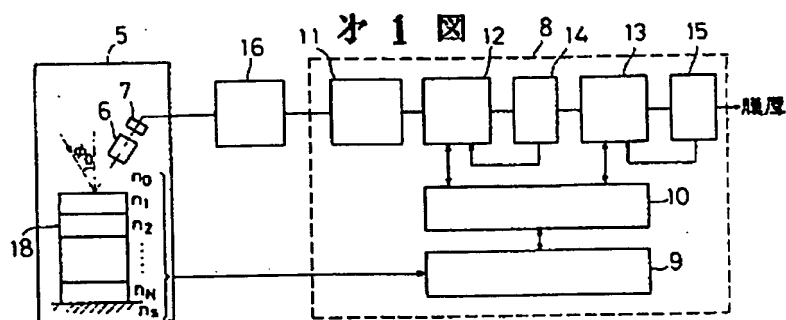


図 9

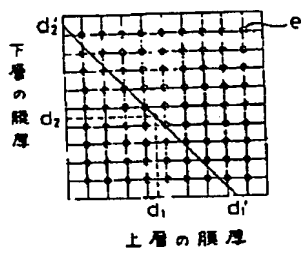


図 10

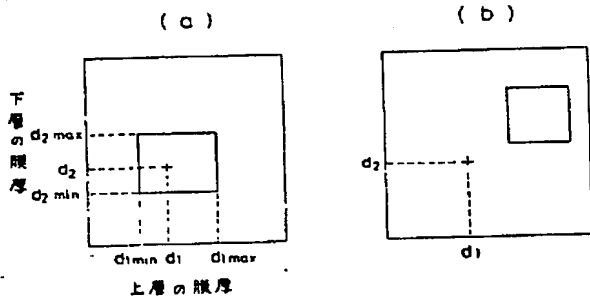


図 11

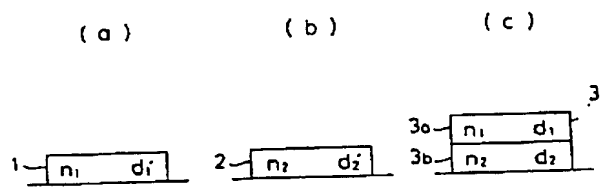


図 12

